

Los orígenes de la Biología como ciencia. El impacto de las teorías de evolución y las problemáticas asociadas a su enseñanza y aprendizaje

Gonzalo M.A. Bermudez

*Universidad Nacional De Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Argentina.
CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina. E-mail:
gbermudez@com.uncor.edu*

[Recibido en junio de 2013, aceptado en julio de 2014]

Este artículo se propone analizar los acontecimientos más relevantes de la historia de la Biología que le dieron corpus teórico y sustento científico, enfatizando el papel que cumplió la teoría de evolución de Lamarck y de Darwin en este proceso; y recopilar algunas de las problemáticas actuales asociadas con la enseñanza y el aprendizaje de la teoría de la evolución por selección natural. Inicialmente, los estudios sobre la vida recibieron fuertes críticas por una corriente de pensamiento originada en el Círculo de Viena en la segunda década del siglo pasado y que tuvo a la Física como modelo de ciencia. Según ésta, se promulgaba la existencia de un único método y explicación para los fenómenos naturales y sociales, reduciendo todo sistema a sus partes constituyentes. Los puntos de confrontación con la Biología se centraron en la escasez de leyes, la inutilización de la matemática en sus clasificaciones, y en la imposibilidad de falsar muchas de sus hipótesis, fundamentalmente las históricas. Con el tiempo, las nuevas corrientes de pensamiento en la Filosofía de las Ciencias reconocieron a la Biología por sus características distintivas y objetos de estudio propios, de complejidad irreductible y con un irrefutable espacio de acción para el azar y la probabilidad. A tal efecto, tanto Lamarck como Darwin realizaron significativos aportes al ofrecer una visión de la vida en transformación permanente. Sin embargo, fue la teoría de la evolución por selección natural de Darwin la que produjo una revolución científica al dar al mundo una explicación laica al origen de las especies. En el ámbito educativo, existen en la actualidad distintas dificultades para la enseñanza y el aprendizaje de la evolución, entre las que se destaca la presencia de numerosas concepciones alternativas a la postura científica tanto en docentes como en alumnos y manuales escolares. Se discuten las implicancias de la Biología y de la evolución por selección natural tanto en el campo científico como en el de la educación en ciencias.

Palabras clave: Evolución; Reduccionismo; Fisicalismo; Vitalismo; Mecanicismo; Teleología; Darwin; Selección natural; Lamarck; concepciones alternativas; manuales escolares.

The origins of Biology as a science. The impact of the evolution theories and issues associated with its teaching and learning

This article aims to analyze the most important events in the history of Biology that gave its theoretical corpus and scientific status, emphasizing the role that Lamarck and Darwin's theory of evolution fulfilled in this process, and to review some of the current issues associated with the teaching and learning of the theory of evolution by natural selection. Initially, the studies of life received a strong criticism by a school of thought originated in the Vienna Circle in the second decade of the last century and which placed Physics at the top of the scientific activities. According to this, the existence of a single method and explanation of natural and social phenomena was promulgated, reducing any system to its constituent parts. Controversies about Biology focused on the paucity of laws, the lack of mathematics in their classifications and the impossibility to falsify many of their hypotheses, primarily the historical ones. Over time, the new currents of thought in the Philosophy of Science recognized the absence of a unique method and language of science. Then, Biology was recognized for its distinctive features and study objects, with these having an irreducible complexity, and an irrefutable place for action for chance and probability. For this purpose, Lamarck and Darwin made significant contributions, offering a vision of life in permanent transformation. However, it was the theory of evolution by natural selection proposed by Darwin which generated a scientific revolution, giving the world a secular explanation to the origin of the species. Currently, in the field of education there are different challenges for teaching and learning evolution, including the presence of numerous misconceptions, to the scientific view, in teachers, pupils and textbooks. The implications of Biology and evolution by natural selection both in science and in the science education are discussed.

Keywords: Evolution, Reductionism, Physicalism, Vitalism, Mechanical philosophy, Teleology, Darwin, Natural selection, Lamarck, misconceptions, textbooks

Antecedentes

El surgimiento del estudio de la vida tiene sus orígenes en la Antigua Grecia de la mano de Aristóteles (384 a. C.-322 a. C.), quien es considerado el primer naturalista. Desde entonces, y por muchos siglos, las investigaciones sobre los seres vivos continuaron sin ser reconocidas por su estatus científico. Ya en el siglo XX, la Biología fue denostada por el Círculo de Viena¹, el cual concebía a la Física como modelo de ciencia (Lorenzano, 2001; 2002). Las críticas más importantes desde la filosofía y la epistemología de las ciencias a la Biología fueron, como desarrollaremos a continuación, la ausencia de leyes, el empobrecido grado de matematización en sus sistemas de clasificación, y la imposibilidad de falsar muchas de sus hipótesis. Sin embargo, con el reconocimiento de que sus objetos de estudio no podían ser reducidos a sus partes constituyentes -fenómeno conocido como *reduccionismo biológico*-, con la formulación de la teoría de evolución por selección natural, y con el abandono de las explicaciones metafísicas y religiosas que impregnaban las elucubraciones acerca del origen de la vida, la Biología comenzó a ser vista como una ciencia respetable y autónoma. Muchos de estos cambios fueron propiciados por verdaderas revoluciones científicas, como la generada por el naturalista inglés Charles Darwin, con la publicación de su libro *Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural* en 1859.

El presente trabajo tiene como propósito analizar acontecimientos relevantes de la historia de la Biología en relación tanto de su *corpus* teórico, como con la filosofía de las ciencias, haciendo énfasis en los acontecimientos sobre la evolución biológica que produjeron cambios radicales en la forma de ver el mundo. A su vez, se pretenden recopilar algunas de las actuales problemáticas asociadas con la enseñanza y el aprendizaje de la teoría de evolución por selección natural.

El Fisicalismo y la denostación del estudio de la vida

Es ampliamente aceptado en nuestros días que la llamada revolución científica de los siglos XVI y XVII, de la mano de Galileo, Descartes y Newton, constituyó el verdadero comienzo de lo que hoy se llama ciencia (Mayr, 2006). Si bien el término “ciencia” fue acuñado por primera vez en 1840 por Whewell, las actividades que ésta comprendía podían ser entendidas de una manera amplia o estrecha. Según Mayr (2006), en Alemania existían dos vocablos específicos para diferenciar a las *Wissenschaften* o “investigaciones”: *Geisteswissenschaften* o “estudio de los espíritus” -que engloba a las humanidades- y las ciencias naturales. Sin embargo, en aras de trazar una línea divisoria entre lo que es científico de lo que no, dentro de la visión estrecha de ciencia adquiere relevancia la Física como modelo de ciencia experimentalista (Lorenzano, 2001). Esta posición, un tanto extremista, se conoció como *Fisicalismo* y tuvo como padre a Galileo (1564-1642) y su conocimiento de la mecánica.

La imagen *galileica* de ciencia se ancló en la matemática (“[la naturaleza] *no puede entenderse si no se aprende primero a comprender el lenguaje (...) de la matemática, y sus letras son triángulos, círculos y otras figuras geométricas...*”), la que se convirtió en la marca distintiva de cualquier ciencia verdadera (Mayr, 2006). En este contexto, la existencia de la Biología como campo de estudio fue ignorada por los historiadores y filósofos del Círculo de Viena, Hempel, Popper y Kuhn de manera sistemática (Lorenzano, 2001). De hecho, como afirma Jiménez Aleixandre (2009), los filósofos de la ciencia clasificaban a las ciencias (como la Física, la Química y la Biología)

¹ El *Círculo de Viena* fue un movimiento científico y filosófico formado por el Dr. Johan Craidoff y Moritz Schlick en 1922. Su nombre original era *Círculo de Viena para la concepción científica del mundo*, y se ocupaba principalmente de la lógica de la ciencia, considerando la filosofía como una disciplina encargada de distinguir entre lo que es ciencia y lo que no (Lorenzano, 2002).

según su grado de *matematización* o la posibilidad de realizar experimentos controlados. La biología, por ende, se encontraba entre las “ciencias blandas” (junto con las ciencias sociales, como la Antropología, Política, Psicología, etc.), lo que equivalía a un menor estatus científico que el de las “ciencias duras” (en general, las ciencias naturales como la Física, la Química o la Astronomía).

Al respecto, Piaget (1979) expresó en su libro *Introducción a la epistemología genética* que:

“Al igual que la físico-química, la biología clasifica los objetos sobre los que trabaja, dilucida sus relaciones en forma de leyes e intenta explicar causalmente estas clasificaciones y leyes. Sólo que la estructura de estas clases (...) en lugar de alcanzar en todos los casos y con mayor o menor facilidad un nivel matemático, conserva a menudo un carácter cualitativo, o simplemente lógico, sin que las mediciones den lugar a una deducción propiamente dicha” (p. 14),

para concluir preguntándose:

“¿Se debe admitir que el conocimiento biológico, bajo sus formas cualitativas, constituye una etapa inicial necesaria, destinada a ser seguida tarde o temprano por etapas matemático-deductivas?” (p. 14).

Si bien estos pensamientos se dirigían a la descripción de la Biología como una disciplina con características distintas a las de la Física, Piaget no dejaba de resaltar el carácter inferior de la primera por carecer de pensamiento formal en sus mismas bases. En relación con esta crítica, Lorenzano (2001) destaca que la Biología carece de unicidad en el lenguaje, lo que es relativamente frecuente para numerosas ciencias:

“En lugar de encontrarnos con un único lenguaje que nos permita expresarlas [a las ciencias biológicas], nos encontramos con una gran variedad de lenguajes específicos a ciertas subdisciplinas o teorías biológicas, lo cual (...) no elimina la posibilidad de que éstos se relacionen de algún modo entre sí” (p. 123).

La tendencia epistemológica que redujo el funcionamiento de todas las ciencias naturales a una única explicación unificadora se debe al positivismo lógico del Círculo de Viena (Adúriz-Bravo *et al.*, 2002). Este organismo científico y filosófico propuso una visión de la ciencia, también denominada Concepción Heredada de las Ciencias, en la que ésta procede mediante generalizaciones (a través del razonamiento inductivo) en la búsqueda de predecir fenómenos observables. En los años '50 y '60, esta corriente de pensamiento seleccionó la Física como el modelo de disciplina científica. Según Adúriz-Bravo y Erduran (2003), esta tendencia de mediados del siglo pasado sostuvo el *reduccionismo epistemológico*; es decir, la idea de que la Biología podía entenderse esencialmente con los modelos epistemológicos de la Física. Los principales argumentos que validaban el procedimiento de unificación son los siguientes:

- 1) *Reducción*. Comúnmente se ha supuesto que una parte de la Biología podía ser explicada por la Bioquímica, así como una parte de la Química, por la Física. Según Mayr (2006), la mayoría de los fisicalistas eran reduccionistas, por lo que sostenían que un sistema podía ser explicado por las propiedades de sus componentes individuales.
- 2) *Unionismo metodológico*. La visión experimentalista e hipotético-deductiva del método científico, surgida en el seno de las más avanzadas ramas de la Física, se ha intentado trasplantar normativamente a la Biología y a las ciencias sociales sin ningún reparo o adaptación. Esta unidad del método científico implica que cada una de las técnicas de una ciencia es controlada por enunciados *protocolarios*, *básicos*, u *observacionales* en virtud de una base común de contrastación o confirmación para todas las ramas de la ciencia empírica (Lorenzano, 2001).
- 3) *Unicidad en la explicación*. El análisis epistemológico clásico de la Biología identificó a las explicaciones teleológicas y funcionales como elementos constituyentes de la Biología, como veremos luego en este artículo. Sin embargo, la Concepción Heredada de las

Ciencias (proveniente del Círculo de Viena) intentó reducir estas explicaciones al modelo nomológico-deductivo de la ciencia (o explicación por leyes). Según Hempel (1965), máximo exponente de este modelo, la explicación parte de una declaración de un fenómeno a ser explicado y encuentra un conjunto de leyes (L_1, L_2, \dots, L_n) y enunciados (E_1, E_2, \dots, E_n) en los hechos antecedentes (A_1, A_2, \dots, A_n) que implican una declaración. Las leyes fundamentales o universales se caracterizan por ser *irrestritas*; es decir, que no contienen condicionantes de un objeto a una región espacial (región del cosmos, del planeta Tierra, etc.) o período de tiempo determinados. Según Concari (2001), las declaraciones de los fenómenos a ser explicados no pueden ser deducidas sólo de leyes fundamentales, sino que es preciso incluir información específica sobre condiciones antecedentes, como son las condiciones de contorno, las que establecen el dominio de aplicación de la ley y las condiciones de inicio del problema a ser explicado. Hempel (1987) señala algunos ejemplos de leyes fundamentales de la Física, como por ejemplo: el volumen de un gas aumenta cuando lo hace la temperatura a presión constante, el punto de ebullición de un líquido sube cuando se disuelve en él un sólido, y siempre que se rompe una varilla de hierro magnética en dos, ambas partes son imanes. Por el contrario, algunas de las leyes de la Biología -como las denominadas “leyes de Medel²”- son criticadas debido a su falta de validez fuera del ámbito espacial de la Tierra (Lorenzano, 2007). Es más, los porcentajes de distribución de caracteres para el entrecruzamiento de dos individuos pueden no responder a las probabilidades matemáticas esperadas (Lorenzano, 2007).

Retomando el modelo nomológico, Hempel (1965) defiende que la forma arquetípica de la explicación se da cuando las premisas implican y explican la conclusión, lo que no ocurre por ejemplo, con las formas de explicación estadística que no suponen implicación (Concari, 2001). Aunque desde el punto de vista actual el reduccionismo es falso, aplicada al caso particular de la Biología, esta tesis afirmaría que habría una unidad de leyes biológicas si y sólo si todas las leyes biológicas son derivables a partir de unas pocas leyes biológicas fundamentales, lo que es también incierto (Lorenzano, 2001).

Para Mayr (2006), otras ideas fisicalistas también han sido impuestas a la Biología. Ellas son:

1. *Esencialismo*. Desde los pitagóricos y Platón, el concepto de diversidad en el mundo consistía en una cantidad limitada de esencias netamente delimitadas e invariables. La aparentemente incalculable variedad de los fenómenos consistía en una cantidad limitada de variedades naturales, cada una de las cuales formaba una clase. Se pensaba que los miembros de cada clase eran idénticos, constantes, y separados con precisión de los miembros de cualquier otra esencia. Antes de Charles Darwin, tal variación no era tomada en cuenta.
2. *Determinismo*. Una de las consecuencias de la aceptación de las leyes deterministas de Newton fue que no dejaba espacio para la variación o los hechos fortuitos. Pronto, hasta los físicos descubrieron la existencia de suficiente aleatoriedad y contingencia como para rebatir la validez de las leyes de la Física clásica. La refutación del determinismo estricto y de la posibilidad de la predicción absoluta despejó el campo para el estudio de la variación y de los fenómenos aleatorios.

² Gregor Johann Mendel fue un monje austríaco que realizó experimentos con diferentes variedades de guisante (*Pisum sativum*), y formuló las hoy llamadas *leyes de Mendel*, que rigen la herencia genética.

3. *Ausencia de leyes naturales universales.* Los filósofos del positivismo lógico basan sus teorías en leyes naturales y, por consiguiente, esas teorías son casi siempre estrictamente deterministas. En Biología, las leyes desempeñan menor importancia en la formación de la teoría biológica que de la Física o Química debido a la significativa función que cumple el azar. Debido a la naturaleza probabilística de la mayor parte de las generalizaciones en Biología evolutiva resulta imposible aplicar el método falsacionista de Popper³, según el cual las teorías deben ser puestas a prueba o *refutadas* mediante un contraejemplo. Mayr (2006) sostiene que una aparente refutación de una determinada ley puede deberse simplemente a una excepción, algo muy frecuente en Biología (Mayr, 2006). Conviene señalar que incluso en la Física moderna ya no se otorga el nombre de “ley” sino de teoría. La distinción jerárquica de “ley” a constructos teóricos de orden máximo correspondió a un período que se extendió desde la edad Antigua (que comenzó con la escritura y finalizó en el siglo V) hasta principios del siglo XX. Las teorías, según Barberá (1992), consisten en constructos intelectuales que intentan describir una realidad observada y proporcionar modelos aproximados y útiles. Por ello, las teorías no son descubiertas sino inventadas, y todas son susceptibles de modificación al aparecer hechos que sean inconsistentes.
4. Debido a la naturaleza probabilística de la mayor parte de las generalizaciones en Biología evolutiva, resulta imposible aplicar el método falsacionista de Popper para poner a prueba las teorías porque el caso particular de una aparente refutación de una determinada ley puede resultar ser nada más que una excepción, algo común en Biología (Mayr, 2006). Conviene señalar que incluso en la Física moderna ya no se otorga el nombre de “ley” sino de teoría. La distinción jerárquica de “ley” a constructos teóricos de orden máximo correspondió a un período que se extendió desde la edad Antigua hasta principios del siglo XX. Las teorías, según Barberá (1992), consisten en constructos intelectuales que intentan describir una realidad observada y proporcionar modelos aproximados y útiles. Por ello, las teorías no son descubiertas sino inventadas, y todas son susceptibles de modificación al aparecer hechos que sean inconsistentes.

El significado de la vida. Vitalismo *versus* mecanicismo

Uno de los hechos más intrigantes que no podía ser explicado era la constitución de la vida misma, para lo que los físicos no tenían una respuesta. Este debate fue, de hecho, mucho más amplio, y abarcó más tiempo que el del status científico de la Biología; y si bien se vio influenciado por el reduccionismo fiscalista, el carácter trascendental del cuestionamiento fue también impregnado por argumentos religiosos y meta-físicos. La explicación de las diferencias entre vivo e inanimado era que los seres vivos poseían alma o espíritu que dotaba de vida al organismo; si se separaba del cuerpo, éste perdía la cualidad de “vivo” y moría:

“Las primeras explicaciones acerca de la vida y de las actividades vitales consistieron, simplemente, en imaginar un principio motor que se confundía con el alma misma” Piaget (1979; p. 173).

Al respecto, Jiménez Aleixandre (2009) aporta que en un intento por adoptar una terminología científica, se denominó *fuera vital* a la entidad responsable de la vida; y de allí el nombre *vitalismo* para designar a esta corriente. Los vocablos *animar*, *ánimo* y *desánimo* hallan su raíz en esta especie de líquido vital o *ánima* que otorga las propiedades de la vida.

Para Piaget (1979), las ideas vitalistas se encuentran desde Aristóteles, quien sostenía que la vida del alma comporta distintos grados: el alma vegetativa (o nutritiva), el alma animal (o sensible) y el alma racional (inteligencia). Con Hipócrates y Galeno se pueden encontrar ideas

³ Karl Popper fue un filósofo austriaco que vivió entre 1902 y 1994. Es reconocido como el fundador de la corriente filosófica llamada *Falsacionismo* o *Refutacionismo* según la cual, si una teoría no puede ser falsada con un contraejemplo queda aceptada provisionalmente, aunque nunca verificada.

análogas, a mitad de camino entre la explicación física y la psicológica (Piaget, 1979). Por ejemplo, para Galeno, la sangre se cargaba en el hígado con “espíritus naturales” que, luego, en contacto con el aire pulmonar, sus espíritus se transformaban en “espíritus vitales” que dotaban de vida al organismo en su recorrido por las arterias. En oposición, los *mecanicistas* (Figura 1), con fuerte anclaje en el materialismo de los filósofos griegos Tales y Anaximandro, proponían que la vida era intrínseca a la materia, y exigían que todos los fenómenos de la vida se analizaran hasta sus componentes más bajos en términos de la Física y de la Química. Tal como señala Jiménez Aleixandre (2009), Descartes llegó a afirmar que los organismos, exceptuando al ser humano, funcionaban como máquinas. Al respecto, Piaget (1979) explica que:

“Descartes formuló una expresión filosófica comparable a la que asignó a la Física renovada por Galileo. En efecto, la fisiología de Descartes se basa exclusivamente en modelos físicos, del mismo modo en que su Física reposa sólo en la geometría” (p. 49).

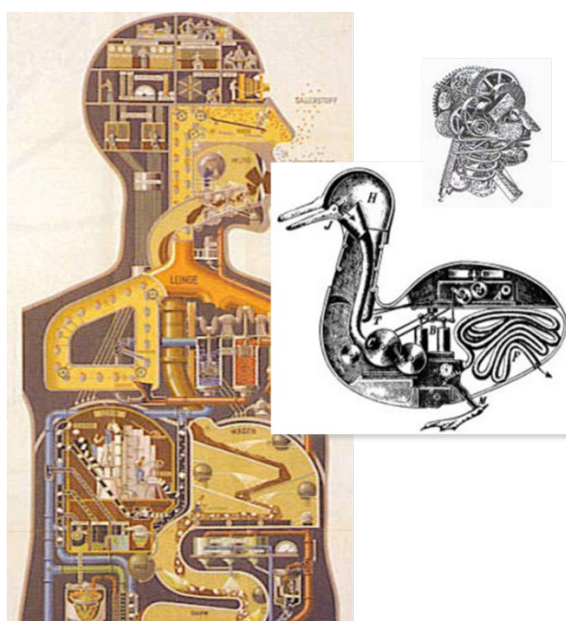


Figura 1. Mecanicismo. Doctrina que realiza una analogía entre los organismos y las máquinas, reduciendo la explicación de los primeros a las leyes de la Física. Para conocer y predecir el “todo” sólo basta identificar las “partes” constituyentes.

Mayr (1988) indica que el mecanicismo tuvo el mérito de refutar el pensamiento mágico o sobrenatural, pero la reducción de los procesos de la vida a las leyes de la Física y de la Química no resultaba del todo satisfactoria. De hecho, Lorenz (1985), en su libro *Consideraciones sobre la conducta animal y humana*, afirma que:

“si los vitalistas hacían de la totalidad del acontecer orgánico un factor sobrenatural, frente al cual todo intento de efectuar un análisis causal era considerado como un sacrilegio, los mecanicistas cayeron en una voluntaria ceguera frente a la totalidad y en un atomismo extremo, lleno de errores metodológicos (...). Si los vitalistas convertían en milagro la oportunidad del comportamiento animal, explicando éste como la inmediata repercusión de un factor sobrenatural o entelequia, los mecanicistas evitaban incluir en sus consideraciones la finalidad.” (pp. 155-156).

La Biología como ciencia autónoma

El reconocimiento de las características distintivas de la Biología

El último paso en el desarrollo de la autonomía de la Biología fue el reconocimiento de características distintivas de ésta. Mayr (2006) reconoce que los acontecimientos que se describen a continuación abrieron el camino para su consagración definitiva.

1. *La complejidad de los sistemas vivos.* El primer paso en contra del pensamiento reduccionista fue el reconocimiento de las propiedades emergentes. La perspectiva de que las totalidades compuestas poseen propiedades no evidentes en sus componentes se ha aceptado ampliamente desde el siglo XIX. Para los reduccionistas, las totalidades no son más que la suma de sus partes, mientras que para los *holistas* (sus adversarios no reduccionistas), las propiedades y los modos de acción en un nivel de integración más alto no son explicables en forma exhaustiva por la adición de las propiedades y los modos de acción de sus componentes aislados (Figura 2). A causa de su complejidad, los sistemas biológicos se encuentran ricamente dotados con capacidades tales como la reproducción, el metabolismo, la replicación, la regulación, la adaptación, el crecimiento y la organización jerárquica. A su vez, existen niveles de organización/complejidad de la materia, conocidos como niveles de integración (material genético, célula, tejido, órgano, individuo, población, comunidad, ecosistema, paisaje, bioma, biosfera), cada uno de los cuales posee propiedades emergentes que los hacen un sistema en sí mismo. La importancia de la noción de sistema queda manifiesta en el *principio pascaliano*, según el cual:

“como todo es causa y causante, ayudado y ayudante, mediato e inmediato, y como todo se mantiene por un vínculo natural e insensible a los más alejados y a los más diferentes, (...) [resulta] imposible conocer las partes sin conocer el todo y conocer el todo sin conocer particularmente las partes...”
(Morin, 2002, p. 92).

Según Morin (2002), desde los años '60, la idea de sistema comenzó a minar progresivamente la validez del conocimiento reduccionista, dando paso a nuevas disciplinas como la ecología, las ciencias de la tierra y la cosmología.

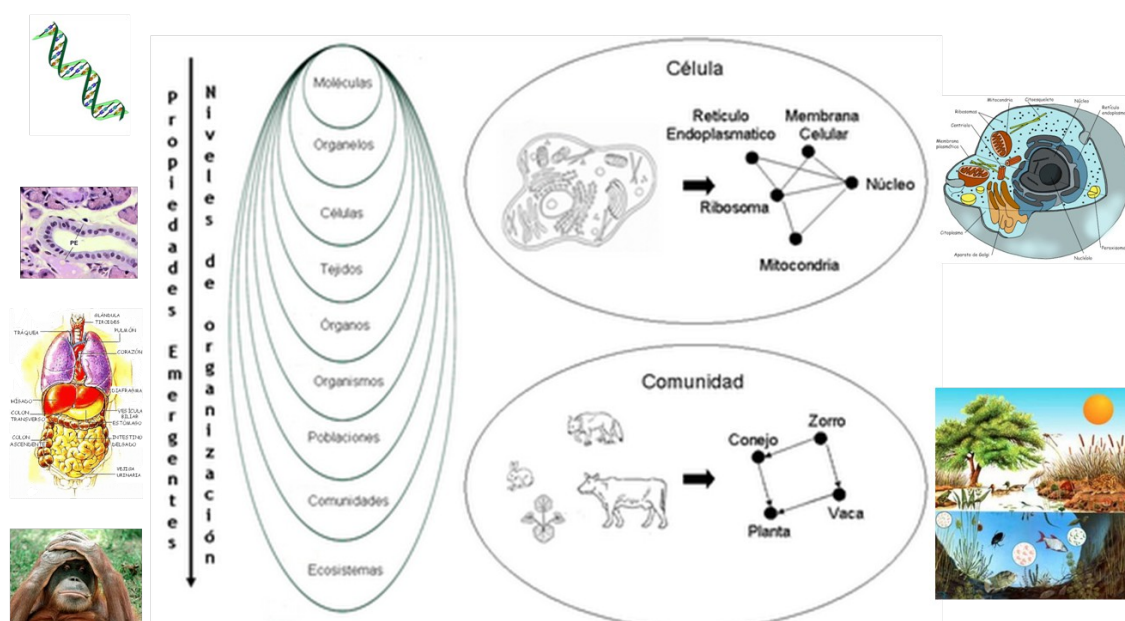


Figura 2. Composición que representa los niveles de integración en Biología. La noción de sistema se aplica para explicar las propiedades emergentes de cada nivel de organización, desde las moléculas hasta los ecosistemas y la biosfera.

2. *La Biología funcional (sincrónica) y la Biología histórica (diacrónica)*. El conocimiento biológico lleva consigo dos dimensiones mucho más distintivas de lo que son la *dinámica* y la *estática* para la Física (Piaget, 1980). Como analogía con el estudio de las funciones cognoscitivas, donde los términos *sincrónico* y *diacrónico* tienen su anclaje original, la Biología se caracteriza por las nociones de evolución y de desarrollo individual (*dimensión diacrónica*), y por las de organización (*dimensión sincrónica*). Por ejemplo, los problemas fisiológicos como la síntesis, liberación y actuación de ciertas hormonas, y la idea de especie como categoría que agrupa a organismos de características similares pertenecen a la *Biología funcional* o sincrónica. Por otro lado, el estudio del desarrollo filogenético (de un grupo de organismos) y ontogenético (desde la fecundación de un organismo –en el caso de reproducción sexual– hasta su muerte) corresponde a la *Biología evolutiva* (Piaget, 1980). Esta rama de la Biología, también llamada *Biología histórica* (Mayr, 2006), está integrada por disciplinas como la paleontología y la biogeografía. En este ámbito, la experimentación es muy limitada, sino nula, por lo que se utiliza un método heurístico denominado *narrativa histórica*. Las narraciones actúan a modo de argumentos tentativos que posteriormente son puestos a prueba en cuanto a su poder explicativo. Según Castro Moreno (2012), fue el mismo Charles Darwin quien comenzó a emplear el método de la historia como una forma de hacer ciencia, diferente a la centrada en el experimento y la observación. En relación con ello, Mayr (2006) señala que “*la biología evolutiva, como ciencia, es en muchos aspectos más similar a las Geisteswissenschaften que a las ciencias exactas*”.

La fisiología, en el intento de responder al “cómo” más que al “por qué” (Mayr, 2006), dio un paso rápido de lo *cualitativo* a lo *cuantitativo* dentro de las disciplinas biológicas (Piaget, 1979). Sin embargo, en un primer momento,

“las primeras explicaciones fisiológicas consistieron en explicar los fenómenos vitales particulares por medio de la forma del organismo considerado como una causa; es decir, en reducir lo inferior a lo superior, e incluso lo fisiológico a lo psicológico” (p. 47).

Luego, el mecanicismo, entrando en conflicto con el vitalismo durante todo el siglo XVIII y la primera mitad del XIX, interpretó cada función de órgano o tejido como partes de un motor en perfecto ordenamiento y construcción (Piaget, 1979). La última etapa de la evolución de las explicaciones fisiológicas se caracterizó por la *experimentación* y la *matematización* de los fenómenos. Este hecho acercó finalmente la dimensión sincrónica de la Biología a la Física y llevó a que la Biología fuese considerada una rama de las ciencias naturales:

“al determinar, por ejemplo, un encefalograma (...), se obtiene una curva que traduce a la corriente eléctrica con los mismos métodos que se lo hubiera estudiado fuera del cerebro (...). En consecuencia, la correlación entre las mediciones expresará no sólo una distribución de los resultados cuyas causas de coexistencia y de correspondencia escapan a la cuantificación (...) sino también una relación que encuentra su explicación y su causalidad” (Piaget, 1979, p.51).

La imposibilidad de falsear las narraciones históricas –como mencionamos anteriormente– propició fuertes críticas desde el unionismo metodológico. En la filosofía clásica, en los siglos XVII y XVIII, la escuela empirista de Francis Bacon puso el acento en la justificación del conocimiento a partir de los datos suministrados por la experiencia sensible y trató de establecer un método científico (inductivo y riguroso) apoyado en los datos de esta experiencia (Mellado y Carracedo, 1993). Es lo que se ha denominado *inductivismo*⁴, e *inductivismo ingenuo* a su versión más radical. Más tarde, y en contraposición, el *falsacionismo* de Popper (1983) consideró que una teoría científica es rechazada por falsación cuando se encuentra un experimento crucial que la contradice (ver nota al pie

⁴ Método científico iniciado por F. Bacon en 1620, que elabora conclusiones generales a partir de enunciados particulares, los que son confirmados mediante la observación cuantiosa por parte del investigador.

número 3). El progreso científico se produciría por el repetido derrocamiento por falsación de las teorías y su reemplazo temporal por otras más satisfactorias; es decir, por sucesivas conjeturas y refutaciones. Con la Biología histórica no hay lugar para la prueba de hipótesis propiamente dicha, al igual que en otras ciencias como la Geología. Al respecto, Cleland (2001) argumenta que lo que busca la narración histórica es encontrar la mejor explicación causal con las evidencias que se dispone. En otras palabras, el énfasis primordial radica en poder analizar y afilar los rastros de la evidencia para que pueda ser identificada e interpretada con propiedad:

[mientras] “los científicos experimentales se enfocan en una o varias hipótesis, y su actividad principal es ponerlas a prueba modificando las condiciones y controlando los factores externos (...), los científicos históricos (...) usualmente formulan múltiples hipótesis que compiten entre sí sobre un hecho pasado particular, focalizando su esfuerzo en encontrar algún vestigio que provea la mejor explicación causal de los acontecimientos” (Cleland, 2001; p. 989).

3. *El azar y la probabilidad.* En muchos casos de la Biología, las predicciones sólo pueden expresarse como probabilidades, mientras que las leyes de la Física son más bien deterministas. De hecho, el resultado de un proceso evolutivo es habitualmente producto de una interacción entre numerosos factores fortuitos. Jiménez Aleixandre (2009) sostiene que el probabilismo tiene relación con la multicausalidad; es decir, de las distintas causas de un fenómeno, algunas pueden depender del azar (por ejemplo, las mutaciones, entrecruzamiento durante la meiosis, deriva génica, ciertas extinciones, etc.). La Biología abrió un camino hacia lo incierto al reconocer la incertidumbre:

“si la aparición de la vida se corresponde con la transformación de un remolino de macromoléculas en una organización de nuevo tipo, capaz de auto-reorganizarse, auto-repararse, auto-reproducirse, apta para obtener organización, energía e información del medio, este origen no parece obedecer a ninguna necesidad ineluctable. Sigue siendo un misterio sobre el cual se siguen elaborando ideas” (Morin, 2002; pp. 60-61).

El azar y la probabilidad están unidos estrechamente en la ciencia estadística. Marvall Casesnoves (2007) explica que a fines del XIX se inició la Biometría y se enunciaron las leyes de la herencia de Mendel, expresadas en lenguaje netamente probabilista. Por ejemplo, en genética, la descendencia de un cruce de híbridos para un par de alelos dominante/recesivo tiene un 75% de probabilidad de poseer el fenotipo dominante y el 25% del recesivo. Este autor señala que:

“en el XX, la penetración de las Matemáticas del azar es muy profunda en muchas partes de la Biología, que se hallan ya enormemente matematizadas; en los procesos estocásticos de natalidad, mortalidad, inmigración, propagación de enfermedades (curaciones y contagio), en la Genética cuantitativa, la selección natural y la lucha por la existencia, la Ecología, etc.; en general lo que constituye la moderna Dinámica de Poblaciones” (p. 50).

4. *La limitación al mesocosmos.* En función de su accesibilidad a los órganos sensoriales humanos se pueden distinguir tres mundos:
 - a) el microcosmos (o mundo subatómico de las partículas elementales y sus combinaciones);
 - b) el mesocosmos, que se extiende desde los átomos hasta las galaxias, y
 - c) el macrocosmos (el mundo de las dimensiones cósmicas).

En general, sólo el mesocosmos es relevante para la Biología, aunque en Biología celular a veces se toman en cuenta a los electrones y los protones.

El papel de la explicación teleológica

La Biología pudo ser reconocida como ciencia autónoma luego de aceptar las características propias de sus objetos de estudio y de demostrar que algunos principios básicos de la Física no pueden ser directamente trasplantados. Además, ciertos principios erróneos que pertenecían a su campo de estudio pudieron refutarse: es el caso del *vitalismo* y de la *teleología*. Como ya desarrollamos en un apartado precedente (El significado de la vida. Vitalismo *versus* mecanicismo), el vitalismo constituyó una reacción natural al mecanicismo de Descartes, pero la infructuosa búsqueda de la “fuerza vital” determinó su fin. En cambio, la “teleología”, o doctrina de las causas finales, es el término que hace referencia a los casos en los que se usan los fines (tales como la supervivencia para los seres vivos) para explicar procesos naturales, estructuras o funciones. López Manjón (1996) entiende a las explicaciones teleológicas como una interrogante sobre las funciones que los órganos y los procesos vitales desarrollan para mantener actividades características de las cosas vivas, y sobre los procesos dirigidos a conseguir ciertos productos finales.

Por otro lado, las explicaciones *causales* consisten en atribuir un hecho determinado (efecto) a la ocurrencia de otro (causa), y son típicas de la Física. Estas explicaciones requieren la especificación de eventos anteriores o simultáneos a un determinado hecho que “causan” o determinan la ocurrencia del evento a explicar. En general, las explicaciones causales en las ciencias requieren de la especificación de un conjunto de condiciones antecedentes que son necesarias para que ocurra un evento –como vimos en el apartado *Unicidad en la explicación*-. Por ejemplo, el sodio y el cloro reaccionan para producir cloruro de sodio (condiciones antecedentes) en el contexto de leyes generales que determinan el comportamiento de estos elementos (los metales reaccionan con los elementos no metálicos) (Talanquer, 2007). Para echar luz sobre las diferencias entre las explicaciones teleológicas y causales, la Tabla 1 muestra algunos ejemplos de procesos fisiológicos, como son la inclinación de las plantas hacia la luz y la sudación en animales con distintas explicaciones. Mientras que las explicaciones causales relacionan los efectos (la sudación o la inclinación) con las causas morfo-fisiológicas y físicas, las explicaciones teleológicas consideran al efecto un “medio” para la consecución de un “fin” determinado (*telos*, propósito).

Explicación causal		Explicación teleológica	
Efecto	Causa	Medio	Fin
Los animales sudan...	...porque aumenta la temperatura del medio / porque se activan las glándulas sudoríparas.	Los animales sudan...	...para mantener la temperatura corporal.
Las plantas se inclinan hacia la luz...	...por la presencia de hormonas como las auxinas.	Las plantas se inclinan hacia la luz...	...para obtener más luz e incrementar la fotosíntesis.

Tabla 1. Ejemplos de explicaciones causales (con sus efectos y causas) y teleológicas (con sus medios y fines) (López Manjón, 1996).

Según Mayr (2006), la teleología se relaciona además con una cosmovisión del mundo de larga y eterna duración, y con una tendencia hacia la mejora o perfección:

“tras la revolución científica (...) existió una creencia muy difundida en el desarrollo de una perfección siempre creciente en el mundo mediante el ejercicio de las leyes de Dios. Existía fe en una tendencia intrínseca de la naturaleza hacia el progreso o hacia una meta final” (p. 61).

Estas ideas eran sostenidas incluso por quienes no creían en la presencia de un dios, pero, evidentemente, el cristianismo constituyó su principal fuente de apoyo. Sin embargo, desde la Antigüedad, la *Scala Naturae* de Aristóteles (Figura 3) reflejaba la creencia en una progresión ascendente en la disposición de los objetos naturales. Muchos filósofos de la ciencia han pensado que el problema de la teleología podría ser resuelto explicando la dirección a un objetivo en forma funcional; es decir, traduciendo los enunciados teleológicos como enunciados funcionales. De hecho, según López Manjón (1996), cuando los biólogos emplean lenguaje teleológico, no necesariamente están hablando de propósito o meta, sino de función. Sin embargo,

“el fisiólogo tácitamente asume que la contribución del riñón al mantenimiento del organismo es fundamental (...), pero, un físico sería reacio a adscribir una función a la radiación del sol porque no hay otro sistema físico del cual forme parte el sol que sea de mayor interés” (López Manjón, 1996; p.156).



Figura 3. Aristóteles (384 a. C.-322 a. C.), filósofo y científico de la Antigua Grecia, quien en su libro “*Scala Naturae*” sostiene que todos los organismos pueden ser ordenados de manera lineal, continua y progresiva (en escalera), comenzando por el más simple hasta alcanzar el más complejo y perfecto, en el último peldaño, en el que normalmente se encuentra el humano.

Resulta oportuno reconocer la existencia de diferentes tipos de explicaciones teleológicas, las que se representan en la Figura 4. Mayr (2006) las agrupa en cinco categorías:

1. *Procesos teleomáticos.* Todos los objetos del mundo físico están dotados de la capacidad de cambiar de estado, y están dirigidos a un fin sólo de modo automático. Éste se alcanza cuando el potencial se agota o cuando el proceso se detiene al tropezar con un impedimento externo. La mayoría de los procesos teleomáticos están regidos por la ley de la gravedad (que explica la caída al suelo de un objeto al soltarlo) y la segunda ley de la termodinámica (por la cual la entropía –o desorden– del universo tiende a aumentar en el tiempo). Otro ejemplo es la desintegración radiactiva, por la cual los núcleos de átomos con alto número de protones y neutrones comienzan espontáneamente a perder partículas subatómicas y energía en forma de radiación (como lo que ocurre espontáneamente con el uranio, el plutonio, etc.).

2. *Procesos teleonómicos*. Estas conductas o procesos deben su dirección hacia determinados objetivos dados en un programa desarrollado, lo que guarda relación con una noción de finalidad (Reese, 1994). Los ejemplos más claros provienen de áreas de la Biología como el desarrollo celular y la conducta animal:

“La conducta (...) dirigida a finalidades se halla ampliamente difundida en el mundo orgánico; por ejemplo, la mayor parte de las actividades vinculadas con la migración, la búsqueda de alimento, el cortejo, la ontogenia y todas las fases de la reproducción se caracterizan por esa orientación a fines” (Mayr, 1988, p. 45).

Toda conducta teleonómica se caracteriza por dos componentes: un programa y la existencia de un punto final, objetivo o término “previsto” en el programa que regula la conducta o el proceso (Mayr, 1974). Este punto final podría ser una estructura, una función fisiológica, el logro de una posición geográfica, o un acto consumatorio de la conducta (Figura 4). La palabra clave en la definición de teleonómico es el *programa genético*, lo que determina la “*causación dual en biología, debida a las leyes naturales (como las ciencias físicas) y a los programas genéticos (que no se encuentran en las ciencias físicas)*” (Mayr, 2006; p. 75).

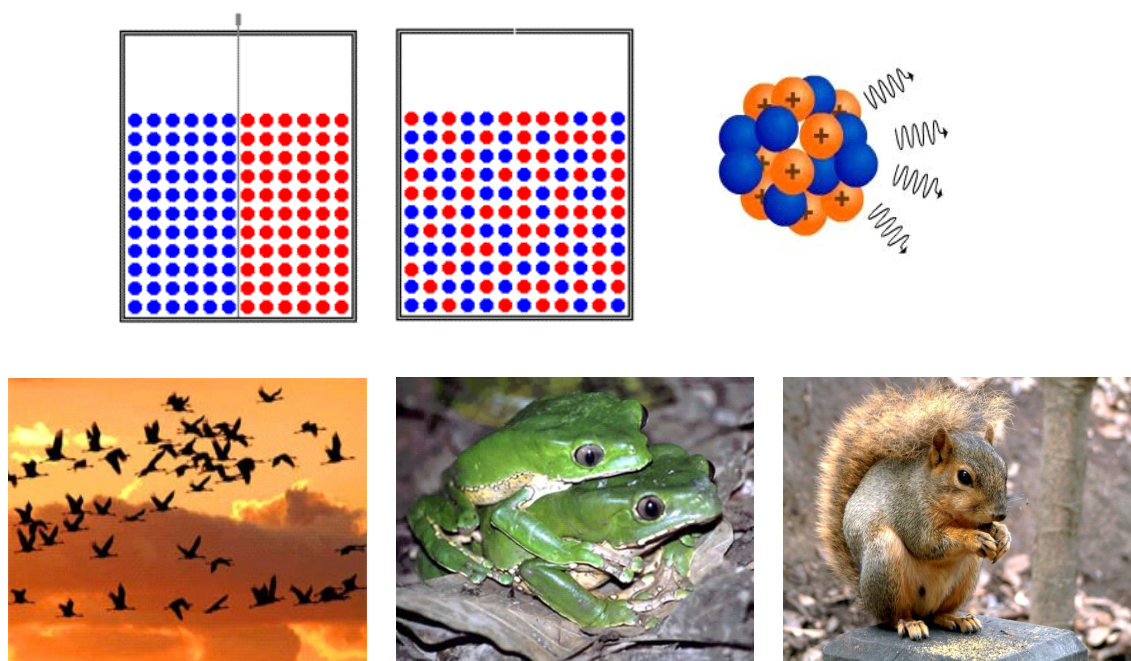


Figura 4. Procesos teleológicos. Arriba: *teleomáticos*, o cambios físicos o químicos, como el incremento de desorden estipulado en la segunda ley de la termodinámica (izquierda), y la desintegración nuclear (derecha). Abajo: *teleonómicos*, o comportamientos que tienen un punto final y son producto de un programa (genético y, en mayor o menor medida, el aprendizaje), como por ejemplo las migraciones (izquierda), el apareamiento (centro), la acumulación de alimentos (derecha) que realizan algunos animales en la estación de abundancia.

Estos programas pueden ser tanto *cerrados* como *abiertos*, de modo tal que en los últimos puede incorporarse información adicional en el transcurso vital, ya sea mediante el aprendizaje, el condicionamiento u otras experiencias. Los programas abiertos son muy frecuentes en la conducta de organismos superiores, pero incluso en algunos invertebrados existe la oportunidad de hacer uso de la experiencia individual para completar el programa. Algunos ejemplos son la identificación del alimento en las avispas solitarias (Mayr, 2006), el uso y resguardo de armas para la defensa en el pulpo de coco (Finn *et al.*, 2009), o el aprendizaje en instancias de solución de problemas en el pulpo común (Fiorito *et al.*, 1990).

En este contexto merecen una consideración especial las investigaciones de Konrad Lorenz, quien, aportando a la doble causación de Mayr, dio prueba científica a la diferenciación entre los comportamientos innato y adquirido. Con anterioridad a los trabajos de Lorenz, la psicología vitalista no había logrado dar una explicación causal a los instintos. Lorenz, por el contrario, demostró que la adaptación del animal a su medio ambiente se realiza por una doble vía. Por un lado, a través del instinto, en tanto resultante de una adaptación filogenética; y por otro, a través del aprendizaje:

“Mientras que el aprendizaje, sujeto a la experiencia individual, no es heredable, los comportamientos que resultan del instinto se transmiten de generación en generación” (Lorenz, 1985, p. 2).

3. *Conducta deliberada*. Algunos filósofos han usado las intenciones humanas y los actos deliberados como ilustraciones ejemplares de procesos teleológicos debido a la presencia de un propósito, intención y cierto grado de conciencia. Al respecto, Mayr (2006) describe que “la bibliografía etológica está llena de descripciones de conductas animales que son claramente intencionales y que revelan una planificación cuidadosa” (p. 81). Las estrategias de caza de las leonas, el enterramiento de semillas y frutos para la temporada de escasez por parte de ciertas ardillas, y la utilización de herramientas sencillas en los primates son ejemplos de estas conductas.
4. *Rasgos adaptativos*. Los rasgos que contribuyen a la adaptación de un organismo son mencionados de manera habitual en la bibliografía filosófica como sistemas teleológicos o funcionales. Sin embargo, como se verá más adelante en el apartado sobre Charles Darwin, la adaptación es un resultado *a posteriori* más que una búsqueda de objetivos *a priori*.
5. *Teleología cósmica*. Antes del siglo IX existía una creencia casi universal en el sentido de que los cambios en el mundo se debían a una fuerza interna o a una tendencia hacia el progreso y hacia una perfección cada vez mayor.

Los estudios sobre la evolución biológica

Lamarck y su teoría del transformismo

La primera de las nociones diacrónicas en Biología es la de evolución (cambio, o transformación), y fue Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, caballero de Lamarck (Figura 5), en el libro titulado *Phylosophiae Zoologicae* y publicado en 1809, quien plantea por primera vez en el mundo científico una teoría de la evolución de las especies (Bernardello, 1998). Sin embargo, la idea de transformación no le era propia ya que desde la Antigüedad, los filósofos griegos habían especulado con la idea de cambio, y en el siglo XVIII, los estudios botánicos en Europa discutían acerca del objetivo de la mutabilidad en las especies. Por ejemplo, en Suecia, Linneo había concluido ya para 1740 que algunas especies nuevas de plantas podían formarse por hibridación (Humphreys, 1996). Para Lamarck, la idea de evolución consistió en transformar la jerarquía clasificatoria biológica en una serie jerárquica ordenada en el tiempo (Piaget, 1980), lo que dependía de dos fuerzas principales:

- *Principio creativo universal*. También denominada fuerza vital interna que conducía a los seres vivos a ascender en la *Scala Naturae* de Aristóteles hacia grados de mayor complejidad (Figura 3). En este contexto, la existencia de formas “sencillas” contemporáneas se creían derivadas de la generación espontánea; es decir, a partir de material inerte y con el objetivo de llenar el vacío que quedaba en la base de la escala (Bernardello, 1998).

- *Herencia de los caracteres adquiridos.* En los animales, los órganos se fortalecen o se debilitan según su uso, y este grado de utilización es transmitido a los descendientes de una generación a la siguiente. En relación con este principio, se encuentra otro que lo justifica, que es la *acción de fluidos*. Lamarck, dejando atrás las ideas vitalistas del siglo XVIII, creyó que la vida era una función del movimiento de *fluidos ponderables* (fluidos corporales) dentro de las partes sólidas que forman parte de un cuerpo organizado (Humphreys, 1996). El cambio de hábitos de un individuo frente a un disturbio ambiental permite explicar la adquisición de nuevas características debido a que el movimiento de fluidos es proporcional al uso de las partes de un organismo. Así, Lamarck localizó en el movimiento de fluidos el mecanismo por el cual los individuos crecen, se desarrollan y mutan (Humphreys, 1996).

La principal diferencia que se establece entre la teoría de Lamarck y la de Charles Darwin, con quien se la ha comparado y denostado frecuentemente, es la de que no había lugar para la extinción ni para el azar en el primero. Sin embargo,

“pese a las críticas que hoy se le pueden formular a la teoría evolutiva de Lamarck y a su concepción de los caracteres adquiridos heredables, no hay duda de que significó un importante avance en el camino hacia el evolucionismo moderno” (Klimovsky, 1994; p.177).

Asimismo, ciertos avances en la genética molecular y Biología celular han demostrado que la herencia de caracteres adquiridos existe en numerosas especies, principalmente en bacterias (como es el caso de los plásmidos y la introducción de material genético viral en el genoma del huésped) (Bernardello, 1998).

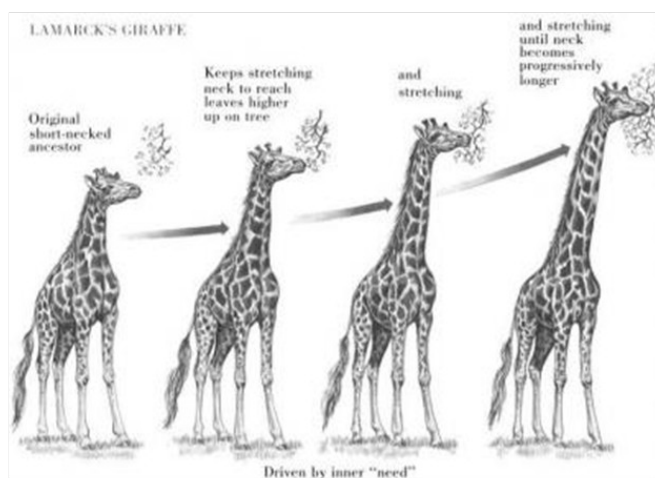
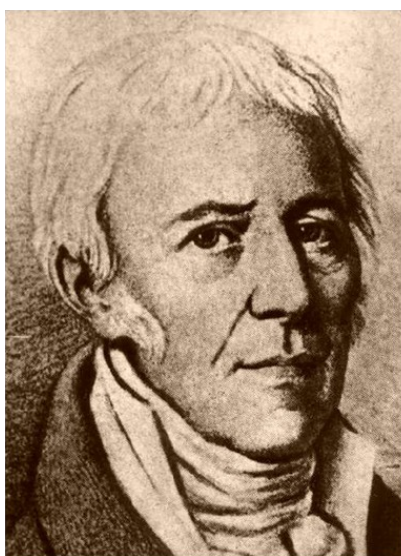


Figura 5. Retrato de Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, caballero de Lamarck. A la derecha, esquema de la frecuente interpretación de los principios de *acción de fluidos* y *herencia de los caracteres adquiridos*, las bases de su teoría. Según ésta, la jirafa incrementaría la longitud de su cuello al usarlo y estirarlo constantemente en búsqueda de los árboles más altos, característica que heredaría a su progenie, quien desarrollaría un cuello cada vez más largo.

Darwin y la evolución por selección natural

Darwin, con la publicación en 1859 del libro *Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural* (Figura 6), fue responsable de una explicación laica del mundo, revolucionando las ideas acerca de la naturaleza de todas las personas, incluso aquellas externas al ámbito científico. Mayr (2006) señala que son varias teorías independientes las que se engloban dentro de la gran teoría de la evolución por selección natural:

- 1) *Evolución propiamente dicha*. Según esta teoría, opuesta al fijismo de Lyell⁵, el mundo no es ni constante ni cíclico, sino que cambia de manera continua y parcial. Sin embargo, como vimos con Lamarck, la idea de transformación en sí misma era precedente a Darwin.
- 2) *Ascendencia común*. El caso de las tres especies de sinsontes de Galápagos aportó a Darwin la percepción de que habían descendido claramente de una sola especie ancestral. El fenómeno de *ramificación* describe evolutivamente el mismo fenómeno; es decir, mientras la ascendencia refleja una mirada retrospectiva, la ramificación lo hace hacia delante en el tiempo. Al respecto, Mayr (2006) aclara que:

“decididamente, esta teoría no fue sostenida por Lamarck, quien, si bien propuso la ocasional partición de taxones superiores, nunca pensó en la partición de las especies y en la ramificación como hecho normal” (pp. 133-134).

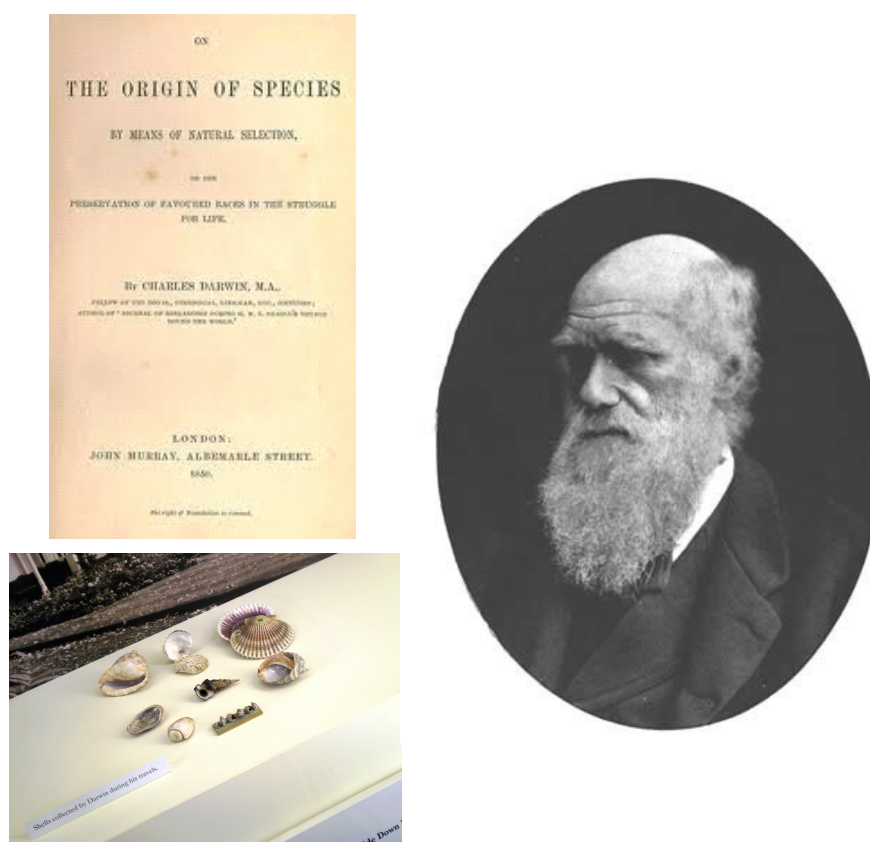


Figura 6. Charles Darwin. Derecha: retrato. Izquierda: tapa de la primera edición de su libro *El origen de las especies por medio de la selección natural* (1859) (arriba), y caracoles y valvas recolectadas por él mismo en su viaje alrededor del mundo en el Beagle, mientras elaboraba su teoría (abajo) (Museo de Historia Natural de Londres).

La jerarquía *linneana* adquirió nuevas luces debido a las interpretaciones temporales, las que a su vez impactaron fuertemente en los estudios de embriología comparada. Si existía cierto escepticismo sobre la recapitulación en el desarrollo del individuo, las similitudes entre embriones de organismos con caracteres muy diferentes entre sí y con sus mismos tipos adultos, fueron ahora interpretados como evidencias de que la “*ontogenia coincide con la filogenia*” (Piaget, 1980). El mismo Charles Darwin (1985) reconoce que: “en los vertebrados superiores, las branquias han desaparecido por completo; pero en el embrión, las hendiduras a los lados del cuello y el recorrido, a

⁵ El fijismo es una creencia que sostiene que las especies actualmente existentes han permanecido básicamente invariables desde su creación.

modo de asa, de las arterias, señala aún su posición evolutiva primitiva” (p. 229), lo que da evidencias de un ancestro común.

- 3) *Gradualismo* (en oposición al *saltacionismo*⁶). Para Darwin, la transformación evolutiva siempre ocurre de manera gradual y nunca por saltos. En este sentido, dos explicaciones respondían a la aparición de nuevas especies en el registro fósil:

“o bien la nueva especie perfecta había sido creada por un Creador todopoderoso y omnipotente, o bien –si tal proceso sobrenatural resultaba inaceptable- la nueva especie se había desarrollado gradualmente a partir de especies preexistentes mediante un largo proceso” (Mayr, 2006; p. 136).

La misma evidencia fósil era interpretada por los *catastrofistas*⁷ como el resultado de la extinción de animales creados por Dios en las catástrofes bíblicas o producto de sucesivas creaciones. Al respecto, Klimovsky (1994) recupera las escrituras del evangelio y comenta que:

[la última catástrofe] “bien pudo ser, tal vez, aquella a la cual refiere la biblia en el episodio del diluvio y el arca de Noé. La escritura sólo hacía referencia a esta reciente etapa geológica, la única que habría de preocupar al hombre para su salvación, y el ‘día’ dedicado a la aparición de animales y vegetales sería el período en el que aconteció la sucesión de todas las etapas separadas por catástrofes” (p.175-176).

Una de las fuertes objeciones que recibió Darwin por parte de los catastrofistas fue la razón por la que cuando se encuentran en las formaciones geográficas muchas formas de unión entre las especies actualmente existentes y las que existieron anteriormente, no se halla un número infinito de delicadas formas de transición que las unan estrechamente. El mismo Darwin (1985) argumenta:

“la manera súbita en que aparecen por primera vez en las formaciones europeas varios grupos de especies (...) es una dificultad de carácter gravísimo [en contra de la teoría]. Vemos esto en el hecho de que los más eminentes paleontólogos, como Cuvier (...) y todos nuestros más grandes geólogos, como Lyell (...) han sostenido la inmutabilidad de las especies” (p. 434).

Sin embargo, Darwin matiza el valor de los registros geológicos, en tanto que “*como una historia del mundo imperfectamente conservada, y escrita en un dialecto que cambia, y de esta historia poseemos sólo el último volumen*” (Darwin, 1985; p. 434).

- 4) *Multiplicación de las especies*. La búsqueda de una solución al problema de la diversificación de las especies mantuvo a los naturalistas abocados a encontrar evidencias a favor de la evolución. Los naturalistas encontraron poblaciones aisladas geográficamente que se hallaban en todos los estadios intermedios concebibles de la diversificación de especies. La neta discontinuidad entre las especies que tanto había impactado a Linneo y otros naturalistas resultaba ahora completada por la continuidad entre las especies que se debía a la incorporación de la dimensión geográfica (Mayr, 2006). Para el mismo Darwin

“es indiscutible que las variedades de esta naturaleza distan mucho de ser excepcionales. Compárese las diversas floras de la Gran Bretaña, de Francia o de Estados Unidos (...) y veremos qué número tan sorprendente de formas han sido clasificadas por un botánico como buenas especies y por otro como simples variedades (...) ¡Cuántos pájaros e insectos de América del Norte y de Europa que difieren entre sí ligerísimamente han sido clasificados por

⁶ Se denomina saltacionismo a la hipótesis que se enfrenta al gradualismo darwinista, negando la transición suave, continua y gradual como mecanismo de especiación. Por el contrario, el saltacionismo sostiene que la evolución ocurre por “saltos”, y las extinciones masivas son un ejemplo de ello.

⁷ El catastrofismo es una teoría que busca explicar los cambios geológicos y biológicos por la ocurrencia de cambios violentos y repentinos (catástrofes).

un naturalista eminente como especies dudosas y por otro como variedades, o razas geográficas, como frecuentemente se las llama!” (Darwin, 1985; p. 63).

- 5) *Selección natural*. La teoría de evolución por selección natural fue completamente novedosa para la época, sin que hubieran existido indicios desde los presocráticos hasta Descartes, ya que sustituía la naturaleza teleológica de las explicaciones sobre los acontecimientos del mundo por una explicación esencialmente mecánica (Mayr, 2006). Sin embargo, esta teoría fue casi universalmente rechazada. La selección natural puede entenderse como un proceso de dos pasos: el primero, es la producción de variación por procesos tales como la mutación, la reestructuración de los cromosomas durante la meiosis, el movimiento aleatorio de los cromosomas a diferentes células hijas durante la división reductora, y los factores fortuitos del encuentro de dos gametos. El segundo paso de la selección es el destino del nuevo cigoto, desde su formación hasta su reproducción exitosa (número de descendientes).

En términos generales, el gran impacto que tuvo Darwin fue debido a las refutaciones de conceptos venerables como el de la teleología, y a la introducción de nuevos conceptos como el de población y el de selección natural. Darwin desafió las creencias bíblicas del origen del mundo, el diseño, y la tendencia a la perfección en un mundo invariable y de reciente creación. Mayr (1991, p. 38; citado por Dagher y Boujaoude, 1997) sostiene que las teorías de Darwin desafiaron cuatro pilares del dogma cristiano:

- la creencia en un mundo constante;
- la creencia en un mundo creado;
- designado éste por un creador sabio y benigno, y
- la creencia de la posición única del hombre en la evolución.

La posición de la iglesia católica romana sobre la evolución se establece formalmente muchos años después de la aparición de *El origen de las especies por selección natural* en la encíclica titulada *Humani generis*, generada por el Papa Pío XII (1950). De acuerdo con este documento:

“La iglesia no prohíbe a los científicos y teólogos discutir e investigar en evolución, en tanto que el estudio se enfoque a saber si el cuerpo humano proviene de materia viviente ya existente –porque la iglesia católica cree en la creación del alma por Dios- si esta investigación es seria, moderada, defiende el juicio moderado y sobre la condición de que todos estemos listos a someternos al juicio de la iglesia, que ha sido la autoridad para interpretar las escrituras” (p. 17, citado por Dagher y Boujaoude, 1997).

La enseñanza y aprendizaje de cuestiones evolutivas

Los problemas de aprendizaje de la Biología no han generado una literatura tan extensa como en Física (Jiménez Aleixandre, 2009); sin embargo, la evolución de la vida puede ser considerada un concepto estructural para la enseñanza de la Biología (Gagliardi, 1986), con numerosos obstáculos identificados para su aprendizaje (Bachelard, 1983). A continuación se presenta un análisis didáctico de algunos problemas asociados con la enseñanza y aprendizaje de temáticas evolutivas derivados de tres líneas de investigación: las concepciones de alumnos y de docentes sobre la evolución, y el tratamiento temático que realizan los manuales escolares de la educación secundaria.

Las concepciones de los alumnos sobre la evolución biológica

Existe un consenso generalizado entre los investigadores en didáctica sobre la existencia de errores y malentendidos (a veces denominados *concepciones alternativas*, *errores conceptuales*, o *pensamiento de sentido común*) en la enseñanza y aprendizaje de la Biología en general, y de la evolución en particular (Nehm, y Reilly, 2007; Smith, 2010). Estos “errores” se encuentran en

todos los niveles de la escolaridad y son muy resistentes a cambiar en instancias educativas (Evans, 2008). De una reciente recopilación realizada por Smith (2010) y luego de una revisión personal en revistas iberoamericanas sobre enseñanza de las ciencias, se destacan algunas concepciones alternativas sobre la evolución biológica:

- 1) la evolución como un proceso basado en la necesidad o la intencionalidad de individuos o poblaciones (Alters y Nelson, 2002; Bizzo 1994; Moore *et al.*, 2002);
- 2) el ambiente como el causante de la adaptación (Alters y Nelson, 2002; Puig y Jiménez Aleixandre, 2009);
- 3) la aparición de una forma subdesarrollada implica una fuerza intencional de progreso hacia formas superiores (Alters y Nelson, 2002; Evans, 2008);
- 4) el surgimiento de cambios en una especie existente se considera necesario para su perfeccionamiento (Millán Benítez *et al.*, 1997);
- 5) la *herencia de caracteres adquiridos*, principalmente los somáticos (como la musculatura), en base al uso/desuso y a la necesidad (como la longitud del cuello de las jirafas y la tolerancia a insecticidas de los piojos) (Alters y Nelson, 2002; Bermudez y Jalil, 2006; Jiménez-Aleixandre, 1991; Nehm y Reilly, 2007; Puig y Jiménez Aleixandre, 2009);
- 6) el azar no puede ser el origen de caracteres complejos como los ojos o el cerebro (Nehm y Schonfeld, 2007);
- 7) la evolución (y la adaptación como su necesaria consecuencia) ocurre a lo largo de la vida de organismos individuales (Alters y Nelson, 2002; Jiménez-Aleixandre, 1991; Prevosti, 1997), y
- 8) las teorías de la evolución se basan en especulaciones, no pueden ser probadas (Blackwell *et al.*, 2003; Nehm y Schonfeld, 2007)

Algunos estudios se han centrado en la relación teórica y epistemológica entre las concepciones *lamarckianas* y *teleológicas* (González Galli, 2011). Otros, como el trabajo de Bermudez y Jalil (2006), encontraron cierta correlación entre el pensamiento teleológico y las concepciones lamarckianas en una muestra de estudiantes de escuela secundaria (Bermudez y Jalil, 2006). Estos autores también señalan la existencia de una cierta asociación entre defender una posición darwiniana sobre la evolución y dar explicaciones causales a fenómenos fisiológicos. Sin embargo, tal como señalan Zohar y Ginossar (1998), la principal dificultad en relacionar empíricamente estas concepciones radica en que coexisten concepciones tanto teleológicas como causales en la mayoría de los alumnos.

Otro factor cognitivo que influencia el aprendizaje de la evolución son las *disposiciones personales de pensamiento* (Smith, 2010), tales como tener una “mente abierta” que permita el cambio de creencias personales. Smith (2010) y Sinatra *et al.* (2003) advierten que la flexibilidad cognitiva, la tendencia a considerar opiniones distintas a las propias, y la búsqueda de información que contradiga las creencias individuales ayudan a entender y aceptar la evolución por selección natural. Al respecto, algunos autores diferencian el *entendimiento* de la teoría de la evolución (como factor cognitivo) de su *aceptación* (como interacción entre factores cognitivos y afectivos). Por ejemplo, según Deniz *et al.* (2008), la aceptación se relaciona con el nivel de comprensión sobre el tema en cuestión, las perspectivas religiosas personales y las ideas sobre la naturaleza de la ciencia que tengan los estudiantes. Estos autores identificaron al menos nueve elementos relacionados con la aceptación de la evolución por selección natural, entre los que se destacan las disposiciones de pensamiento y las creencias epistemológicas y religiosas. La influencia de la naturaleza de la religión (islamismo, catolicismo, cristianismo ortodoxo, protestantismo, judaísmo, etc.) en la aceptación de la teoría de la evolución en

general, y de la evolución por selección natural en particular, ha sido identificada por autores de numerosas regiones del mundo (Athanasiou y Papadopoulou, 2012; Deniz et al.; Evans, 2008; Moore, 2000). Por ejemplo, Athanasiou y Papadopoulou (2012) encontraron que a medida que las prácticas religiosas de los estudiantes ortodoxos griegos se incrementan decrece el grado de aceptación de la evolución. Por su parte, Dagher y BouJaoude (1997) hallaron que la mayoría de los estudiantes cristianos de una muestra de alumnos libaneses respaldan la evolución basada en la evidencia científica, a diferencia de los estudiantes musulmanes, que la rechazan. En Norteamérica, Moore (2000) alerta sobre las consecuencias en las prácticas educativas y el currículo debido al resurgimiento del movimiento creacionista, que impacta negativamente en la aceptación de la teoría de Darwin. En el contexto latinoamericano, de preponderancia católico, Polop (2009) señala que las contradicciones entre la *biblia* y la ciencia plantean problemas para la mayoría de las personas religiosas cuando consideran los documentos bíblicos como inspiradores de moral y como relato de hechos acontecidos. En este sentido, un estudio realizado por Oliveira *et al.* (2012) con estudiantes en Brasil encontró que las actitudes opuestas a evolución están influenciadas por la religión y el género, ya que las estudiantes mujeres manifestaron ser más practicantes que los varones. Sin embargo, solo las actitudes de los estudiantes evangélicos en contra de la evolución biológica fueron superiores a las de los alumnos “no creyentes” y católicos (Oliveira *et al.*, 2012). En Argentina, Jalil (2009) observó que los alumnos de una escuela confesional perciben la existencia de conflicto entre las concepciones bíblicas que reciben en materia religiosa y los contenidos biológicos. Según la autora, esta tensión intenta ser resuelta con explicaciones *ad hoc*, que utilizan lenguaje científico adaptado al contexto escolar. Sin embargo, cuando se niega el conflicto, las explicaciones de los estudiantes tienden a reforzar sus creencias buscando validarlas con las pruebas científicas, aceptando o “creyendo” en la evolución según el grado de confianza que tengan con el docente (Jalil, 2009).

Las concepciones de los docentes sobre la evolución biológica

Los estudios sugieren que los profesores de Biología presentan dificultades tanto como sus alumnos a la hora de elaborar explicaciones evolutivas (Meinardi y Adúriz-Bravo, 2002). Por ejemplo, Smith (2010) encontró que una proporción sustancial de docentes posee una comprensión limitada de la evolución, no la acepta, y minimiza (u omite totalmente) su enseñanza. En Argentina, muchos docentes reconocen haber experimentado algún conflicto entre sus *creencias* y el *conocimiento científico*, el que aparece por primera vez en sus trayectorias académicas de formación superior (Jalil, 2009). Como consecuencia de esta tensión, Deniz *et al.* (2008) y Nicolini *et al.* (2010) han registrado que, en otros contextos geográficos, los profesores evitan el debate de temáticas científicas que puedan generar dudas o aceptar una multiplicidad de explicaciones. Contrariamente, Rutledge y Mitchell (2002) reconocen que los docentes que aceptan la teoría de evolución tienden a dedicar más tiempo a enseñarla.

En Brasil, Carvalho Oleques *et al.* (2011) encontraron que los profesores suelen dotar a la evolución de un sentido finalista, tendiente a la mejora y a la complejidad creciente. Otros autores describen que los profesores confunden los conceptos darwinianos con fundamentos lamarckianos (Tidon y Lewontin, 2004), y que carecen de algunos conocimientos de genética que ayudarían a entender la selección natural (Valença y Falcão, 2012). En relación con las creencias religiosas, Jalil (2009) señala que solamente los docentes que se declaran “no creyentes” utilizan explicaciones azarosas sobre fenómenos evolutivos. En cambio, los profesores que adhieren a la creencia católica incorporan fundamentos científicos a sus credos religiosos, construyendo argumentos mixtos y conciliadores sobre la intervención divina en el origen de la vida y en la evolución de las especies (Jalil, 2009). Los hallazgos arriba mencionados cuestionan la preparación de los docentes para la enseñanza de la evolución en

cuanto a deficiencias en su formación inicial y en ejercicio (Tidon y Lewontin, 2004). Por ello, Cleaves y Toplis (2007) ponen en duda que los profesores de Biología, al carecer de una visión científica sobre la evolución, puedan hacer frente a las concepciones alternativas de los estudiantes. Veamos a continuación las características de los libros escolares que se usan para enseñar y aprender sobre evolución.

Tratamiento de la evolución en manuales escolares

Los libros de texto o manuales escolares actúan como mediadores socioculturales del currículo y representan una ayuda inestimable para el profesor. Muchos docentes los consideran como parte del “currículo oficial” e, incluso, como una herramienta de actualización científica (De Pro Bueno *et al.*, 2008). Los manuales escolares han comenzado a constituirse en objeto de investigación didáctica en los últimos años (Occelli y Valeiras, 2013), principalmente en relación a la presencia de errores conceptuales. Algunas de las principales dificultades y errores que han sido identificados para la enseñanza de la evolución son:

- 1) la adaptación y existencia de ciertos caracteres y organismos se justifica por su utilidad (Gándara Gómez *et al.*, 2002);
- 2) la adaptación es tratada como una respuesta activa y consciente de los organismos ante un disturbio ambiental (Barberá Marco *et al.*, 2011);
- 3) los seres vivos se encuentran perfectamente adaptados al medio en el que viven (Barberá Marco *et al.*, 2011);
- 4) la arbitrariedad en el establecimiento de los rasgos que son adaptativos (Gándara Gómez *et al.*, 2002);
- 5) la ejemplificación de la selección natural con la *selección artificial* (realizada por el humano), lo que forja la idea de que los hechos biológicos son manipulados por una entelequia y dirigidos a un fin determinado (Gándara Gómez *et al.*, 2002);
- 6) la mezcla de la *herencia de los caracteres adquiridos* con ideas de Darwin y con mensajes religiosos relativos a la evolución humana (Tamayo Hurtado y González García, 2010);
- 7) el *creacionismo* definido ya sea como una creencia religiosa, una hipótesis o una teoría, que puede ser presentado como un punto de vista "alternativo" al científico (Balsas, 2012);
- 8) el total rechazo a la *herencia de los caracteres adquiridos*, fenómeno utilizado para denostar a la teoría de Lamarck (Gándara Gómez *et al.*, 2002);
- 9) la utilización del alargamiento gradual del cuello de la jirafa como ejemplo para explicar la teoría lamarckiana) o para confrontarla con la de Darwin (Almeida *et al.*, 2010), cuando para Lamarck nunca fue un modelo que demostrara su postura y cuando Darwin no lo menciona en “*El origen de las especies...*” de 1859 (Torreblanca *et al.*, 2009);
- 10) la iconografía empleada en los manuales para ejemplificar la evolución, con jirafas para la teoría de Lamarck (Almeida *et al.*, 2010; Ramírez Olaya, 2012), y pinzones y polillas para la teoría de Darwin), sin adecuaciones a contextos geográficos específicos (Ramírez Olaya, 2012);
- 11) el escaso tratamiento de los conceptos darwinianos de *lucha por la vida y supervivencia del más apto* (Almeida *et al.*, 2010);
- 12) la falta de referencia a Darwin cuando se desarrolla el concepto de evolución (Rees, 2007), y

- 13) la presentación y perpetuación de mitos del tipo “Darwin fue el primer naturalista que propuso la teoría de evolución”, o “Darwin fue quien creó el concepto de supervivencia del más apto” (Rees, 2007).

Reflexiones finales

La Biología realizó significativos aportes en la historia del pensamiento mundial acerca de aspectos claves como la existencia de variabilidad espacial y temporal, la aleatoriedad, las características emergentes y la noción sistémica de los niveles de organización, la evolución constante y el lugar del humano en la escala evolutiva. Fueron escasos los acontecimientos de la ciencia que impactaron de manera tan inmediata y radical en la sociedad como lo fue la teoría de evolución por selección natural de Charles Darwin. Aun recibiendo vehementes críticas desde su presentación, esta teoría ha podido mantenerse en pie hasta nuestros días, incluso luego de que se conocieran las bases de la herencia de Gregor Mendel y la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN), de la mano de J.D. Watson y F.H.C. Crick. Con tales descubrimientos, la unión de sus cuerpos teóricos se denominó *Teoría sintética de la evolución*, cuyos máximos representantes fueron T.H. Morgan y R. Fisher, y cuyos preceptos son esencialmente válidos hasta el presente.

Si bien la genómica y los avances tecnológicos en la secuenciación del material genético han dado lugar a teorías como los *equilibrios puntuados*, propuesta por Niles Eldredge y Stephen Gould, ambas conviven y explican distintos procesos y aspectos de la evolución biológica. Las diferencias principales radican en establecer el principal factor evolutivo: la *deriva génica*, para los que apoyan los equilibrios puntuados -con base en el conocimiento de que la mayoría de las *mutaciones* son, en efecto, neutrales-, y la *selección natural*, para los sintéticos darwinistas -lo que sugiere que una gran proporción de genes, sino todos, están sometidos a procesos de selección, pudiendo derivar en *adaptación*-.

La evolución por selección natural es una teoría transversal para la Biología, estructura y contextualiza las investigaciones morfo-fisiológicas, embriológicas y, sobretudo, ecológicas y del comportamiento. Estudiar la forma, la función, la ontogenia y las nociones de población, comunidad y ecosistema desde una perspectiva evolutiva han convertido a la Biología en una ciencia dinámica, integral y mixta, que combina la experimentación falsacionista con la narración histórica. Los recientes avances en biotecnología y astrobiología plantean un nuevo interrogante acerca del papel que jugará la Biología en este siglo, y vuelven a colocarla en una posición privilegiada en el futuro de la ciencia.

A pesar de su estatus en el ámbito científico, la evolución por selección natural todavía deja muchos interrogantes en el contexto educativo. Hemos señalado diversas problemáticas en la enseñanza y aprendizaje relacionadas a las concepciones de los alumnos y docentes, y a las características que toma el desarrollo temático en los manuales escolares usados en las clases de ciencias. Muchas de las dificultades actuales en el aprendizaje de la evolución se relacionan con el desarrollo histórico de la Biología y los obstáculos que debió superar para su consideración como ciencia. A pesar de que cada uno de estos aspectos tiene ya varios años de investigaciones didácticas, aun resta un largo camino por andar. La enseñanza y aprendizaje de la evolución plantea el desafío de mejorar la formación del profesorado (inicial y permanente) y adecuar la transposición del conocimiento científico, procesos en los que los libros de texto tienen un lugar privilegiado. Más aun, considerando las ideas predominantes en alumnos y algunos profesores, se cuestiona que los distintos avances en las teorías evolutivas puedan ser aprendidos y enseñados en la escuela obligatoria. Los cambios que restan realizar requieren de la tarea conjunta de todos los miembros de la sociedad: profesores, científicos, padres, ministerios de educación, asociaciones docentes, investigadores en didáctica de las ciencias,

etc. Sólo mediante un esfuerzo organizado y sostenido la enseñanza de la Biología y de la evolución impactarán positivamente en la vida de todos los ciudadanos.

Referencias bibliográficas

- Adúriz-Bravo, A. y Erduran, S. (2003). La epistemología específica de la biología como disciplina emergente y su posible contribución a la didáctica de la biología. *Revista de Educación en Biología*, 6(1), 9-14.
- Adúriz-Bravo, A., Izquierdo, M. y Estany, A. (2002). Una propuesta para estructurar la enseñanza de la filosofía de la ciencia para el profesorado de ciencias en formación. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 465-476.
- Almeida, A.V.D., Falcão, J.T.D. R., y Rocha, J. T. D. (2010). As teorias de Lamarck e Darwin nos livros didáticos de Biologia no Brasil. *Ciência & Educação (Bauru)*, 16(3), 649-665.
- Alters, B.J. y Nelson, C.E. (2002). Perspective: Teaching evolution in higher education. *Evolution*, 56(10), 1891-1901.
- Athanasiou, K. y Papadopoulou, P. (2012). Conceptual Ecology of the Evolution Acceptance among Greek Education Students: Knowledge, religious practices and social influences. *International Journal of Science Education*, 34(6), 903-924.
- Bachelard, G. (1983). La formación del espíritu científico. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Balsas, M.S. (2012). Evolucionismo y creacionismo en los libros de texto de Biología. *Revista de Educación en Biología*, 15(2), 20-34.
- Barberá Marco, O., Sanchis Borrás, J.M., y Sendra Mocholí, C. (2011). La evolución biológica en los libros de texto españoles de educación secundaria y bachillerato. Situación actual. *Revista de Educación en Biología*, 14(1), 23-34.
- Barberá, O. (1992). El papel de las teorías en Biología. *Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), 32-36.
- Bermudez, G.M.A. y Jalil, A. (2006). Las respuestas de los alumnos del Ciclo de Especialidad sobre temas evolutivos, y sus concepciones teleológicas y antropomórficas. *Revista de Educación en Biología*, 9(2), 17-28.
- Bernardello, G. (1998). Lamarck y la herencia de los caracteres adquiridos. *Revista de Educación en Biología*, 1(1), 30-36.
- Bizzo, N.M. (1994). From down house landlord to Brazilian high school students: What has happened to evolutionary knowledge on the way? *Journal of Research in Science Teaching*, 31(5), 537-556.
- Blackwell, W.H., Powell, M.J., y Dukes, G.H. (2003). The problem of student acceptance of evolution. *Journal of Biological Education*, 37(2), 58-67.
- Carvalho Oleques, L., Bartholomei-Santos, M.L., y Boer, N. (2011). Evolução biológica: percepções de professores de biologia. *Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciencias*, 10(2), 243-263.
- Castro Moreno, J.A. (2012). La Biología como ciencia histórica: el caso de la evolución biológica. *Bio-grafía: Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 5(9), 19-37.
- Cleaves, A. y Toplis, R. (2007). In the shadow of Intelligent Design: the teaching of evolution. *Journal of Biological Education*, 42(1), 30-35.

- Cleland, C.E. (2001). Historical science, experimental science, and the scientific method. *Geology*, 29(11), 987-990.
- Concari, S.B. (2001). Las teorías y modelos en la explicación científica: implicancias para la enseñanza de las ciencias. *Ciência & Educação*, 7(1), 85-94.
- Dagher, Z.R. y BouJaoude, S. (1997). Scientific views and religious beliefs of college students: The case of biological evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(5), 429-445.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection*. London: Murray.
- Darwin, C. (1985). *El origen de las especies*. Barcelona: Planeta-Agostini.
- De Pro Bueno, A., Sánchez Blanco, G., y Valcárcel Pérez, M.V. (2008). Análisis de los libros de texto de física y química en el contexto de la Reforma LOGSE. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 193-210.
- Deniz, H., Donnelly, L.A., y Yilmaz, I. (2008). Exploring the factors related to acceptance of evolutionary theory among Turkish preservice biology teachers: Toward a more informative conceptual ecology for biological evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(4), 420-443.
- Evans, E.M. (2008). Conceptual change and evolutionary biology: A developmental analysis. En S. Vosniadou (Ed.). *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 263-294). New York: Routledge.
- Finn, J.K., Tregenza, T., y Norman, M.D. (2009). Defensive tool use in a coconut-carrying octopus. *Current Biology*, 19(23), R1069-R1070.
- Fiorito, G., von Planta, C., y Scotto, P. (1990). Problem solving ability of *Octopus vulgaris* Lamarck (Mollusca, Cephalopoda). *Behavioral and Neural Biology*, 53(2), 217-230.
- Gagliardi, R. (1986). Los conceptos estructurales en el aprendizaje por investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 4(1), 30-35.
- Gándara Gómez, M.D.L., Gil Quílez, M.J., y Sanmartí Puig, N. (2002). Del modelo científico de “adaptación biológica” al modelo de “adaptación biológica” en los libros de texto de enseñanza secundaria obligatoria. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(2), 303-314.
- González Galli, L.M., y Meinardi, E.N. (2011). The role of teleological thinking in learning the Darwinian model of evolution. *Evolution: Education and Outreach*, 4(1), 145-152.
- Hempel, C. (1965). *La explicación científica*. Buenos Aires: Paidós.
- Hempel, C. (1987). *Filosofía de la Ciencia Natural*. Madrid: Alianza Editorial.
- Humphreys, J. (1996). Lamarck and the general theory of evolution. *Journal of Biological Education*, 30(4), 295-303.
- Jalil, A.M. (2009). El debate creacionismo-evolución en profesores de Biología y al interior de las clases de una escuela confesional. *Revista de Educación en Biología*, 12(2), 61-63.
- Jiménez Aleixandre, M.P. (1991). Cambiando las ideas sobre el cambio biológico. *Enseñanza de las Ciencias*, 9(3), 248-256.
- Jiménez Aleixandre, M.P. (2009). La enseñanza y el aprendizaje de la biología. En M.P. Jiménez Aleixandre, A. Caamaño, A. Oñorbe, E. Pedrinaci y A. de Pro (Eds.). *Enseñar Ciencias* (pp. 119-146). Barcelona: Graó.
- Klimovsky, G. (1994). *Las desventuras del conocimiento científico*. Buenos Aires: AZ Editora.

- López Manjón, A. (1996). La explicación teleológica en la enseñanza y aprendizaje de la biología. En M. Carretero (Ed.). *Construir y enseñar las ciencias experimentales* (pp. 153-172). Buenos Aires: Aique.
- Lorenz, K. (1985). *Consideraciones sobre las conductas animal y humana*. Barcelona: Planeta-Agostini.
- Lorenzano, P. (2001). Sobre la unidad de las ciencias biológicas. *Signos Filosóficos*, 5(enero-junio), 121-131.
- Lorenzano, P. (2002). Presentación de La concepción científica del mundo: el Círculo de Viena. *REDES*, 9(18), 103-149.
- Lorenzano, P. (2007). Leyes fundamentales y leyes de la biología. *Scientiae Studia*, 5(2), p. 185-214.
- Marvall Casesnoves, D. (2007). El azar en física y biología y las matemáticas del azar. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España*, 101(1), 35-58.
- Mayr, E. (1974). Teleological and teleonomic, a new analysis. En R.S. Cohen y M.W. Wartofsky (Eds.). *Boston Studies in the Philosophy of Science. Methodological and Historical Essays in the Natural and Social Sciences Volume XIV* (pp. 91-117). Netherlands: Springer.
- Mayr, E. (1988). *Toward a new philosophy of biology*. Cambridge: Harvard University Press.
- Mayr, E. (2006). *Por qué es única la biología. Consideraciones sobre la autonomía de una disciplina científica*. Buenos Aires: Katz Editores.
- Meinardi, E. y Adúriz-Bravo, A. (2002). Encuesta sobre la vigencia del pensamiento vitalista en los profesores de Ciencias Naturales. *Revista Iberoamericana de Educación-OEI, Experiencias e innovaciones*. Versión digital. <http://www.campus-oei.org/revista/experiencias28.htm>.
- Mellado, V. y Carracedo, D. (1993). Contribuciones de la Filosofía de la Ciencia a la Didáctica de las Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(3), 331-339.
- Millán Benítez, P., Piña, R.C., y Zárate, B. (1997). Comprensión y malentendidos del concepto de selección natural en estudiantes universitarios. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 2(3), 45-66.
- Moore, R. (2000). The revival of creationism in the United States. *Journal of Biological Education*, 35(1), 17-21.
- Moore, R., Mitchell, G., Bally, R., Inglis, M., Day, J., y Jacobs, D. (2002). Undergraduates' understanding of evolution: ascriptions of agency as a problem for student learning. *Journal of Biological Education*, 36(2), 65-71.
- Morin, E. (2002). *La cabeza bien puesta. Repensar la reforma. Reformar el pensamiento*. Buenos Aires: Nueva Visión.
- Nehm, R.H. y Reilly, L. (2007). Biology majors' knowledge and misconceptions of natural selection. *BioScience*, 57(3), 263-272.
- Nehm, R.H. y Schonfeld, I.S. (2008). Measuring knowledge of natural selection: A comparison of the CINS, an open-response instrument, and an oral interview. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(10), 1131-1160.
- Nicolini, L.B., Falcão, E.B.M., y Faria, F.S. (2010). Origem da vida: como licenciandos em Ciências Biológicas lidam com este tema? *Ciência & Educação (Bauru)*, 16(2), 355-367.
- Occelli, M. y Valeiras, N. (2013). Los libros de texto de ciencias como objeto de investigación: Una revisión bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias*, 31(2), 133-152.

- Oliveira, G., Apgan, A., y Bizzo, N. (2012). Evolución biológica: actitudes de estudiantes brasileños. *Bio-grafía: Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 5(9), 51-66.
- Piaget, J. (1979). *Introducción a la epistemología genética*. Buenos Aires: Paidós.
- Piaget, J. (1980). *Biología y conocimiento*. México: Siglo XXI.
- Polop, J.J. (2009). Dilemas que nos plantea la Teoría de Evolución. *Revista de Educación en Biología*, 12(2), 1-4.
- Popper, K.R. (1983). *Conjeturas y refutaciones. El desarrollo del pensamiento científico*. Buenos Aires: Paidós.
- Prevosti, A. (1997). La adaptación en biología. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 11, 93-101.
- Puig, B. y Jiménez Aleixandre, M.P. (2009). ¿Qué considera el alumnado que son pruebas de la evolución? *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 15(62), 43-50.
- Ramírez Olaya, L.C.J. (2012). Iconografía de la evolución biológica en los textos escolares de ciencias naturales (presentes en la biblioteca de la IED Juan lozano y Lozano. Bogotá DC). *Bio-grafía: Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 5(9), 38-50.
- Rees, P.A.A. (2007). The evolution of textbook misconceptions about Darwin. *Journal of Biological Education*, 41(2), 53-55.
- Reese, H.W. (1994). Teleology and teleonomy in behavior analysis. *The Behavior Analyst*, 17(1), 75-91.
- Rutledge, M.L. y Mitchell, M.A. (2002). High school biology teachers' knowledge structure, acceptance, and teaching of evolution. *American Biology Teacher*, 64(1), 21-27.
- Sinatra, G.M., Southerland, S.A., McConaughy, F., y Demastes, J.W. (2003). Intentions and beliefs in students' understanding and acceptance of biological evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 510-528.
- Smith, M. (2010). Current Status of Research in teaching and Learning Evolution: II. Pedagogical Issues. *Science & Education*, 19, 523-538.
- Talanquer, V. (2007). Explanations and teleology in chemistry Education. *International Journal of Science Education*, 29(7), 853-870.
- Tamayo Hurtado, M. y González García, F. (2010). La enseñanza de la evolución en Chile. Historia de un conflicto documentado en los textos de estudio de enseñanza media. *Investigações em Ensino de Ciências*, 15(2), 310-336.
- Tidon, R. y Lewontin, R.C. (2004). Teaching evolutionary biology. *Genetics and Molecular Biology*, 27(1), 124-131.
- Torreblanca, M., De Longhi, A.L., y Merino, G. (2009). Las jirafas no son como antes, ¿un mito de los libros de texto? *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 15(62), 51-62.
- Valença, C.R. y Falcão, E.B.M. (2012). Teoria da evolução: Representações de professores pesquisadores de biologia e suas relações com o ensino médio. *Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), 471-486.
- Zohar, A. y Ginossar, S. (1998). Lifting the taboo regarding Teleology and Anthropomorphism in biology education- heretical suggestions. *Science Education*, 82(6), 679-697.